

방사선투과영상의 기하학적 왜곡 보정에 관한 연구 The Study on image correction of geometric distortion in digital radiography image

박상기 · 안연식 · 길두송
S. K. Park, Y. S. Ahn, D. S. Gil

(접수일 : 2011년 01월 20일, 수정일 : 2011년 05월 12일, 채택확정 : 2011년 5월 23일)

Key Words : Computed Radiography(전산화 방사선투과검사), Weldments Inspection(용접검사), Boiler Tube(보일러튜브), Radiography Image Sensitivity(방사선투과식별도)

Abstract : This study is made to provide with a method for correcting the geometric distortion of the digital radiography image by analytical approach based upon the inverse square law and Beer's law. This study is aimed to find out and improve a mathematic model of nonlinear type. Variations in the alignment of the X-ray source, the object, and imaging plate affect digital radiography images. A model which is expressed in parameter values; e.g, angle, position, absorption coefficient, length, width and pixel account of radiography source, is developed so as to match the sample image. For the best correction of the digital image that is the most similar to the model image, a correction technique based upon tangent is developed; then applied to the digital radiography images of steel tubes. As a result, the image correction is confirmed to be made successfully.

1. 서 론

화력발전소는 고온고압의 환경에서 운전됨으로 높은 신뢰성이 요구된다. 특히 중요설비인 보일러 압력부는 수만개의 보일러 튜브 용접부로 이루어져 있으며 이들 중 하나의 용접부가 손상되어도 발전소를 정지해야 되기 때문에 모든 용접부에 대해 방사선투과검사를 실시하여 품질을 확보하고 있다. 최근 방사선투과영상진단 분야에는 디지털기법이 도입되어 DR(directed radiography)과 CR(computed radiography) 방식이 속속 개발 보급되고 있다¹⁾. 그러나 이들 디지털 방식은 실험실환경 혹은 측정조건이 갖춰진 장소에서 일부 사용되고 있을 뿐 대다수 현장에서는 전통적인 엑스레이 필름 감광방식을 고수하고 있다. 디지털방식들이 디지털화된 영상취득이나 직접적인 컴퓨터 분석과 영상처리가 가능하다는 이점이 있는 반면, 측정 편의성이나 간편함 및 이동측

정의 용이성이라는 현장적용 면에서 해결해야 할 문제가 남아있다. 방사선투과검사 기술의 발전은 결국 보다 판독이 용이한 영상을 신속하고 간편하게 획득하기 위함이라고 할 수 있다. 방사선투과영상 취득은 첫 번째 단계인 검사체의 방사선투과와 두 번째 단계의 영상의 데이터화로 구분된다. 기존의 필름방식과 디지털 방사선투과 방식은 영상의 데이터화에서는 차이가 있으나 방사선투과 단계에서는 기본 구도가 동일하다. 방사선 선원과 검사체, 그리고 영상취득 검출판의 기본 측정 구조에 의해 매질의 방사선투과 결과가 검출판 표면에 영상화한다. 측정 방식의 차이는 필름방식에서는 필름을, 디지털방사선 방식에서는 반도체 평판 센서와 휘진성 형광물질이 도포된 영상판(image plate)를 사용한다는데 있다^{2,3)}. 어떠한 방식을 채택하든 그 결과는 영상화되어 판독자에게 제시되고 판독자는 자신의 시각적 판별 능력, 경험 그리고 숙련도에 의해 진단하고 판단한다. 판독 결과는 주관적이고 경우의존적이다. 문제는 어떠한 측정 방식을 채택하든 방사선 영상은 매질을 투과한 광자의 분포특성이 검출판에 반영되어 영상이 생성되는 것일 뿐 대상체의 기하학적 구도와 비례가 보존되거나 실체가 투영되는 것은 아니라는 점이다. 측정상의

박상기(교신저자) : 한전 전력연구원 엔지니어링센터
E-mail : skpak@kepri.re.kr, Tel : 042-865-5557
안연식 : 한전 전력연구원 엔지니어링센터
길두송 : 한전 전력연구원 엔지니어링센터

기하학적 요인과 방사선 방출, 흡수 및 투과에 따른 양자특성에 의해 관측된 영상에는 본래 대상체가 갖고 있는 구조 정보에 비선형 왜곡이 발생한다. 이러한 비선형성이 다각적으로 나타나기 때문에 판독자는 영상으로부터 정확한 정량적 판별보다는 경험에 의존한 정성적 판단을 내릴 수밖에 없었다. 수치적 정확도보다는 영상의 선명도가 먼저 해결해야 할 과제였다. 방사선투과영상의 정량적 연구는 영상보정 및 재구성을 통한 진단의 정확도 향상 면에서 매우 중요하다. 더욱이 비선형 특성의 수학적 추정 은 측정 부위에서의 특징 추적과 추출, 패턴분류 및 이상 징후 진행 상태의 정량적 예측을 위하여 필수적으로 요구된다. 그러나 종래까지의 산업용방사선영상에 관한 연구는 주로 고화질이나 선명도향상, 에지처리 및 잡음제거에 치중해 있었다. 측정에 따른 왜곡 현상은 정확한 수치적 접근이 아닌 제품 개발시 제작사에서 제공하는 영상생성에 관한 기술시험 분석보고서 정도이다. 본 연구에서는 화력발전소 초임계압 보일러 보일러튜브의 방사선영상을 대상으로 하였다. 평판과 원형튜브로 구분하여 방사선 조사, 흡수 및 투과에 따른 역자승법칙⁴⁾과 비어의 법칙(Beer's law)⁵⁾을 결합한 방사선영상 생성특성을 규명하고 그 수학적 모델을 제시한다. 그리고 수치적으로 처리된 비선형 모델과 영상화소의 배열을 근거로 물리적 내지는 기하학적 조건들에 의해 왜곡되어 나타난 영상을 보정하고자 하였다.

2. 방사선투과영상의 취득조건

방사선투과는 매질과 매질이 위치한 자연공간에서 진행된다. 방사선은 역자승법칙에 의해 식 (1)과 같이 선원으로부터의 거리의 자승에 반비례한다. 방사선이 투과하는 매질 전후의 방사선량은 식 (2)로 표현하는 비어의 법칙에 의존한다.

$$I_{ir} = \frac{I_i}{4\pi r^2} \quad (1)$$

$$I_{out} = I_{in} \exp(-\mu\lambda) \quad (2)$$

식 (1), (2)에서 I_i : 선원방출 방사선량, r : 선원으로부터의 거리, I_{ir} : 거리 r 에서의 방사선량, λ : 대상체 매질의 두께, μ : 흡수계수, I_{in} : 매질의 입사 방사선량 그리고 I_{out} : 매질 통과 직후의 방사선량이다. 방사선영상의 취득조건은 방사선 선원은 점선원이고, 검사체는 내경과 외경에 의한 두께를 갖는 원통

형으로서 길이 l , 외경 r_o 에 대하여 $l \gg r_o$ 가 성립한다. 평판인 경우 너비 w 에 비해 $l \gg w$ 이면 비선형 왜곡은 길이방향으로만 발생한다. 이러한 측정조건을 성립하기 위해서는 선원에서의 방사선방출 조사각도 θ 가 평판 대상체 너비의 범주 내에서 $\theta \rightarrow 0$ 이어야한다. 이러한 조건은 선원과 검사체와의 거리를 충분히 이격시켰을 때 가능한 조건이다. 방사선 선원-검사체-검출판의 일련의 측정구조는 자연공간에서 설정되며 선원으로부터의 방사선 조사는 입사각 θ 를 수반한다. θ 는 모델링 전 과정에서 영상의 기하학적 생성에 기여하는 중요한 변수이다. 자연공간에서의 방사선량 계산은 역자승법칙, 매질에서는 비어의 법칙을 적용하여 선원에서의 방사선량에 대한 검출판에 도달하였을 때의 방사선량을 산출한다. 본 연구에서 영상형성은 일정두께의 평판매질과 원형튜브라는 두 대상체에서 고찰한다.

2.1 일정 두께 평판매질의 영상형성

일정 두께 λ 인 평판의 경우는 Fig. 1과 같이 방사선 선원과 검사체 사이에 위치한다. 식 (1)과 (2)를 적용하여 입사각 θ 에 따른 매질과 방사선량 변화 I_0 와 I_d 를 식 (3)과 (4)와 같이 구한다.

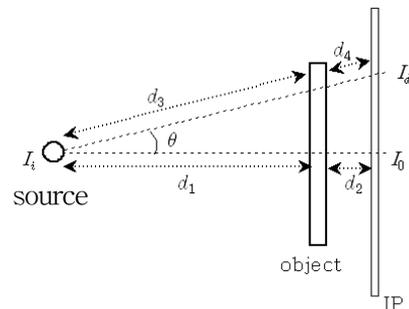


Fig. 1 Measuring structure for flat object

$$I_0 = \frac{I_i}{(4\pi d_1 d_2)^2} \exp(-\lambda\mu) \quad (3)$$

$$I_d = \frac{I_i}{(4\pi d_3 d_4)^2} \exp\left(-\frac{\lambda\mu}{\cos\theta}\right) \quad (4)$$

측정환경의 입사각에 의해 $I_0 \neq I_d$, $I_0 > I_d$ 이고 I_0 와 I_d 가 도달하는 검출판 상의 영상변환에 의한 화소값 d_0 와 d_d 도 $d_0 \neq d_d$ 가 성립한다. $\theta \approx 0$ 인 경우는 $I_0 \approx I_d$ 이다. 여기서 d_0 는 방사선이 검출판과 수직으로 입사한 경우로서 대상체 매질의 정확한 투과영상 화소값이다. 반면에 d_d 는 매질의 방사선 투과영

상을 정확히 형성하고 있지 않다. 실제 대상체 매질의 밀도와 두께가 일정함에도 불구하고 이와 같은 비선형적 차이는 보정을 통해 균일하게 처리해야 한다. Fig 2는 평판금속매질의 방사선측정실험시 생성된 측정조건 1과 2를 충족하는 영상과 한 축 방향 화소의 회색도 변화의 관측 예이다. 그림의 점선은 영상의 가로축 방향으로 하나의 화소배열을 추출함을 의미한다.

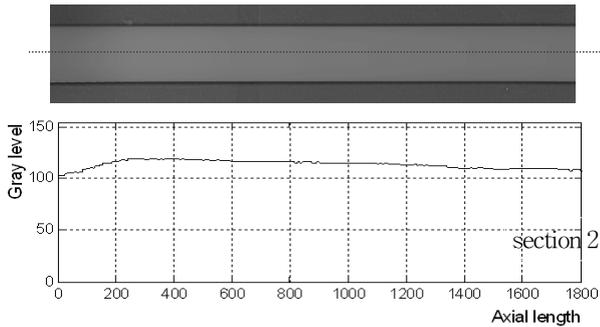


Fig. 2 Image gray level variation for axis length

Fig. 2에서 길이방향의 1/6 지점에 d_0 가 위치하고 이를 기점으로 좌우 화소값들이 증가, 감소하고 있다. 그림에서 좌우 대칭이 아닌 것은 측정시 대상체와 검출판의 간격이 일정치 않은 측정 오차에 기인한다.

2.1.1. 데이터 보정과 영상보정

식 (3)과 (4)의 I_d 와 I_0 사이의 편차는 θ 에 의해 발생한 측정오차이다. $\theta \neq 0$ 의 영향이 그림 2의 예에서와 같이 관측되는 방사선영상에서 위치에 따른 차이로 나타난다. 방사선영상 형성과정에서 잡음이 유입된다 하더라도 일정 두께의 매질을 통과한 결과는 잡음혼입 범위 안에서 일률적인 값을 가져야한다. 이를 위해 I_0 를 기준으로 위치에 따른 결과 값들을 보정할 필요가 있다. I_d 와 I_0 의 영상변환 화소값을 d_d 와 d_0 , 그 때의 입사각 θ_d 에 대해 이들 사이에는 식 (3)과 (4)로부터 유도한 식 (5)의 관계가 성립한다.

$$\frac{I_d}{I_0} = \frac{d_d}{d_0} = \exp[\lambda\mu(1 - \sec\theta_d)] \cos^4\theta_d \quad (5)$$

여기서 μ 는 실험을 통한 추정값^[5]이고 λ 는 측정값으로서 일정하다. d_d 와 d_0 는 관측값으로서 d_0 는 고정값이고 d_d 는 영상에서의 화소배열 위치상 지점별로 값이 변한다. 방사선측정실험에서 이들 인자를 산출한 후 식 (5)로부터 각각의 d_d 에서의 θ_d 를 계산한다. 그리고 d_0 와 d_d 의 화소값 배열에서의 거리를 각

각 l_0 와 x , 보정된 화소값을 d_x 라고 할 때, d_x 는 Fig. 3의 기하학적 원리에 의해 식 (6)과 같다.

$$d_x = d_d + |l_0 - x| \tan\theta_d \quad (6)$$

식 (6)은 Fig. 2 예의 그래프에서 보는 바와 같은 x 의 변화에 따른 화소값의 상승과 하강 모두에 적용 가능하다. 수식의 절대값은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 (l_0, d_0) 를 향하여 상승시는 $(l_0 - x)$, (l_0, d_0) 부터 하강시는 $(x - l_0)$ 에 해당한다. 실제 영상처리과정에서 $(n_1 \times n_2)$ 의 화소배열을 갖는 방사선영상 $(n_1 \gg n_2)$ 의 경우 길이방향의 배열 $(1 \times n_2)$ 을 순차적으로 추출하여 식 (6)을 사용하여 값을 보정한 후 이를 너비배열로 확산한 다음 종합하여 보정영상을 구성한다.

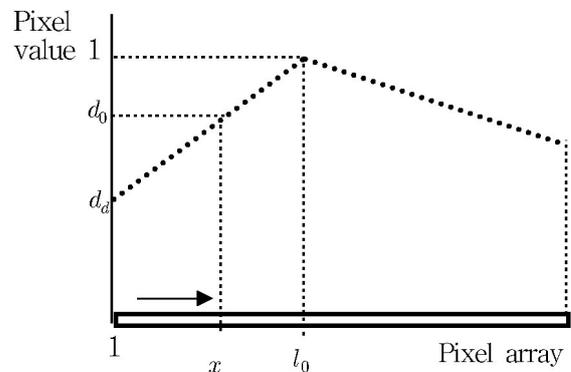


Fig. 3 Pixel array and correction principle

2.2. 원형튜브의 영상형성

내경 r_1 , 외경 r_2 , 두께 $(r_2 - r_1)$ 인 원형 튜브가 Fig. 4와 같이 방사선 선원과 검출판 사이에 위치한다.

2.2.1 비선형 구도

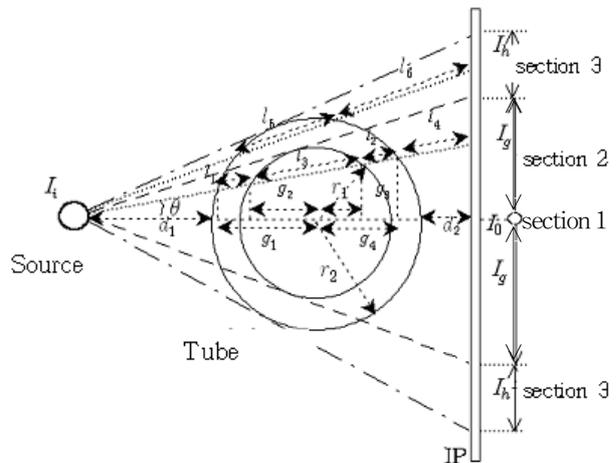


Fig. 4 Measuring structure for circular tube

식 (1)과 (2) 및 Fig. 4의 원과 직선의 도형 관계식 으로부터 검출판에서의 방사선량을 구한다. 원형 구조에 의해 방사선 투과 상태가 달라지므로 다음 세 가지 유형으로 나누어 고찰한다.

i) I_0 , 구간 1: 방사선이 검출판과 수직 입사

$$I_0 = \frac{I_i}{256\pi^3(d_1r_1d_2)^2} \exp[2(r_1 - r_2)\mu] \quad (7)$$

ii) I_g , 구간 2: $\theta \neq 0$, 투과중간에 공간이 존재

$$I_g = \frac{I_i \cos^2 \theta}{(4\pi)^3 (g_1 l_3 l_4)^2} \exp(-2l_1 \mu) \quad (8)$$

여기서 $l_1 = \frac{g_1 - g_2}{\cos \theta}$, $l_2 = \frac{g_4 - g_3}{\cos \theta}$, $l_3 = \frac{g_2 + g_3}{\cos \theta}$

$$l_4 = \frac{r_2 - g_4 + d_2}{\cos \theta}, \quad a_1 = 2 \tan^2 \theta (d_1 + r_2)$$

$$g_1 = a_1 + \cos^2 \theta \sqrt{r_1^2 \tan^2 \theta - \tan^2 \theta (d_1 + r_2)^2 + r_2^2}$$

$$g_2 = a_1 + \cos \theta \sqrt{r_1^2 - \sin^2 \theta (d_1 + r_2)^2}$$

$$g_4 = -a_1 + \cos^2 \theta \sqrt{r_1^2 \tan^2 \theta - \tan^2 \theta (d_1 + r_2)^2 + r_2^2}$$

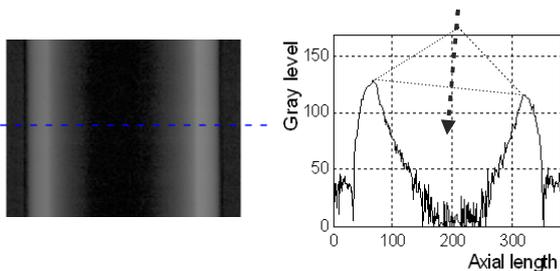
$l_1 \sim l_4$ 와 $g_1 \sim g_4$ 는 측정값인 상수 r_1, r_2, d_1, d_2 에 대해 θ 의 함수이다.

iii) I_h , 구간 3: $\theta \neq 0$, 매질로만 투과

$$I_h = \frac{I_i \cos^2 \theta}{(4\pi)^2 (g_1 l_6)^2} \exp(-l_5 \mu) \quad (9)$$

$$l_5 = \frac{g_1 + g_4}{\cos \theta}, \quad l_6 = \frac{r_2 - g_4 + d_2}{\cos \theta}$$

여기서, g_1 은 외경과 투과선이 만나는 선원에 근접한 점과 중심과의 거리, g_4 은 외경과 투과선이 만나는 검출판에 근접한 점과 중심과의 거리이다. Fig. 5는 보



(a) Radiography image (b) Gray level variation

Fig. 5 Gray level of tube image for axis length

일러튜브의 방사선 영상취득영상과 한 축 방향 화소의 회색도 변화의 관측 예이다. 점선은 영상의 가로축 방향으로 하나의 선 데이터를 추출함을 의미한다.

2.2.2 보정요소와 영상보정

구간 2와 구간 3에서 방사선 조사량 I_g 와 I_h 가 검출판에서 영상으로 나타내기 위해서는 검출판을 선원방향으로 등거리가 되도록 기하학적으로 구부려야 (bending) 한다. 이 때 각 구간의 g_4 를 고려하였을 때 구부림에 의해 교정된 거리 l_c 는 구부림 전후의 차이로서 식 (10)이다.

$$l_c = g(\theta) = k_1 + h_1(\theta) \quad (10)$$

여기서 $k_1 = d_1 + 2r_2 + d_2$, $h_1(\theta) = -\frac{d_1 + r_2 + g_4}{\cos \theta}$

구간 2에서는 l_4 와 구간 3에서는 l_6 를 l_c 로 보정한 다. I_0, I_g, I_h 의 영상변환 화소값 d_0, d_g, d_h 에 대하여 d_g 와 d_h 의 보정값 d_{gc} 와 d_{hc} 는 식 (8)과 (9)의 l_4 와 l_6 를 l_c 로 대치한 식들 사이의 관계로부터 식 (11), (12)과 같이 구한다.

$$d_{gc} = d_g h_g(\theta), \quad h_g(\theta) = (l_4/l_c)^2 \quad (11)$$

$$d_{hc} = d_h h_h(\theta), \quad h_h(\theta) = (l_6/l_c)^2 \quad (12)$$

여기서 θ 의 범위는 Fig. 3의 측정값들로부터 산출한다.

3. 실험 및 결과

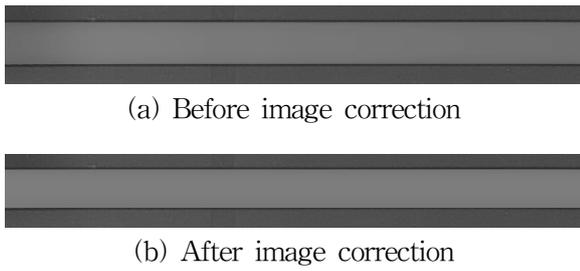
3.1. 평판 매질

Fig. 6은 영상을 보정한 결과이다. 보정전후의 영상은 결과가 육안으로는 식별하기 쉽지 않으므로 영상 화소배열의 한 가로배열에 대해 보정전후의 결과를 Fig. 6의 (c)와 (d)에 제시하였고 (e)는 보정진행 시 $\tan \theta_d$ 의 변화이다.

3.1.1 결과 고찰

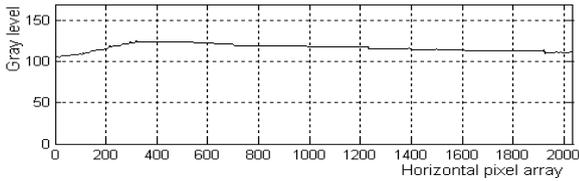
평판강판 매질의 방사선영상검출 측정에 따른 기하학적 오차가 보정작업에 의해 수정되고 관측영상의 보정이 이루어졌다. 영상보정은 화소별로 θ_d 산출과 식 (6)의 적용에 의해 순차적으로 진행되어 관측 화소값에 대한 보정 처리함을 확인할 수 있다.

($\mu=0.1459, \lambda=10.25\text{mm}$)

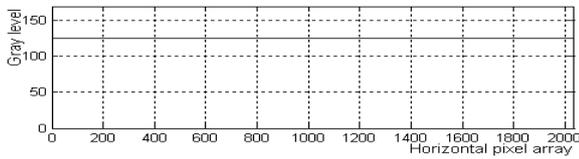


(a) Before image correction

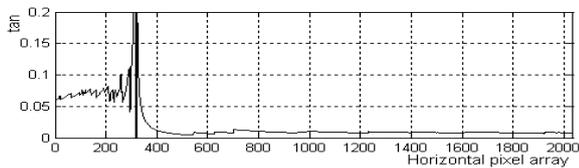
(b) After image correction



(c) Image pixel change on length(before correction)



(d) Image pixel change on length(after correction)



(e) variation of $\tan\theta_d$

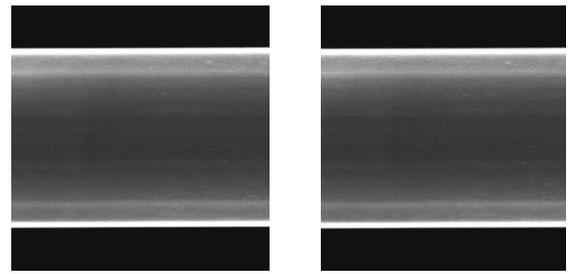
Fig. 6 Image correction effect for flat steel object

3.2 원형튜브 매질

Fig. 7은 영상을 보정한 결과로서 본 실험에서는 관측된 원형튜브 방사선영상의 너비방향 부분 선별영상에 대한 영상보정을 실시하였다. 결과가 육안으로는 식별하기 쉽지 않으므로 하나의 세로 화소배열 그래프 Fig. 7의 (c)와 (d)로 그 효과를 제시하였다. 원형튜브의 $r_1=34.4, r_2=48.0, d_1=220.0$ (단위, mm)이다.

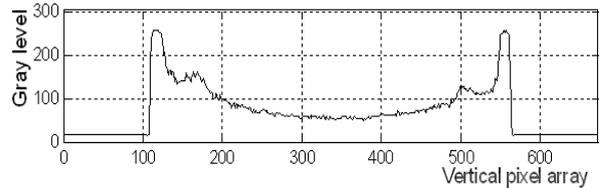
3.2.1 결과고찰

Fig. 7에서 수직의 한 축 배열별로 Fig. 7의 (e)만큼의 보정행위가 순차적으로 발생하여 검출관의 선원오로의 등거리 구부림 효과가 영상보정으로 재형성됨을 확인할 수 있다.

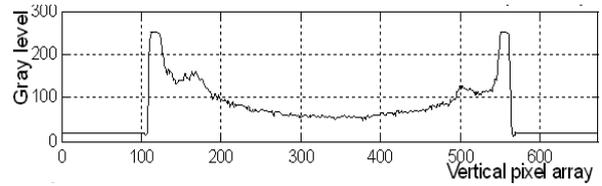


(a) Before image correction

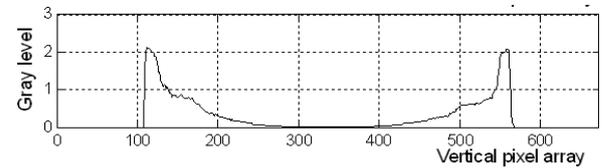
(b) After image correction



(c) Image pixel change on radius(before correction)



(d) Image pixel change on radius(after correction)



(e) Image pixel deviation on radius(correction before and after)

Fig. 7 Image correction effect for steel tube object

4. 결론

방사선투과영상의 취득목적은 영상에서 결함의 유무와 정확한 위치, 크기를 평가하는 것이다. 방사선투과영상의 취득시 발생한 기하학적 조건에 의한 왜곡된 영상을 보정하지 않고 결함의 정확한 크기를 평가하는 것은 불가능하다. 방사선투과영상을 취득하는 조건에 의해 발생된 기하학적 변형에 의해 생성된 디지털 방사선투과영상을 보정하는 방법을 제시하였으며, 본 연구를 통하여 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 평판과 원형튜브에 대한 방사선투과영상의

기하학적 위치와 측정구조에 근거한 수학적 모델을 추론하였다.

(2) 기하학적 영향에 의한 평판과 원형튜브의 방사선투과영상의 화소값을 보정하는 것을 수학적 으로 나타내었다.

(3) 왜곡된 방사선투과영상을 실험과 시뮬레이션을 통하여 영상 보정이 가능함을 확인하였다.

참고문헌

1. Sang-Ki Park, Yeong-Ho Lee, "The Study on Image Sensitivity Evaluation For Digital Radiography Image", The Korea Society for Power System Engineering, 2008, v.12, no.6, pp 70-77
2. R. J. Patei, "Digital applications of radiography" in Proc. of 3rd MENDT, Manama, Barain, Nov. 2005, pp 210-215
3. E. Deprins, "Computed radiography in NDT applications" in Proc. of 16th WCNDT, Montreal, Canada, Aug. 2004, 315-320
4. E. R. Williams, J. E. Faller and H. A. Hill, "New experimental test of Coulomb's Law laboratory upper limit on the photon rest mass" Physical Review Letters, 1971, Vol. 26, pp. 721-724.
5. C. Melvin and K. Sbdel-Hadi, "A simulated comparison of turnstile and Poisson photons for X-ray imaging" in Proc. of IEEE CCECE, Manitoba, Canada, May, 2002, pp. 1165-1170